doi:10.13866/j.azr.2020.01.19

乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应①

赵生龙[1,2]， 左小安[1]， 张铜会[1]， 吕 朋[1,2]， 岳 平[1]， 张 晶[1,2]
(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院乌拉特荒漠草原研究站/奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 以内蒙古乌拉特荒漠草原灌丛和草本植物群落为对象,研究这 2 种植物群落的物种组成、物种多样性及其与地上生物量关系对不同放牧处理(对照、中牧、重牧)的响应。结果表明:① 随着放牧强度的增加,灌丛群落中红砂(*Reaumuria songarica*)和碱韭(*Allium polyrhizum*)的优势度增大,沙生针茅(*Stipa glareosa*)的优势度减小;重牧降低草本群落中沙生针茅的优势度,增加了蒙古韭(*Allium mongolicum*)和碱韭的优势度。② 不同放牧处理显著降低了灌丛和草本群落的盖度、高度以及灌丛群落的密度,消除了灌丛和草本群落之间盖度的差异($P>0.05$)。中牧降低灌丛群落的 Pielou 均匀度指数,重牧降低灌丛群落的物种丰富度,灌丛和草本群落的其他多样性指数在放牧处理之间无显著差异($P>0.05$)。除物种丰富度外,其他多样性指数在灌丛和草本群落之间差异显著($P<0.05$)。③ 不同放牧处理降低了灌丛和草本群落的地上生物量和凋落物量,导致灌丛和草本群落之间地上生物量的显著差异($P<0.05$)。④ 地上生物量与 Simpson 优势度指数负相关,与 Shannon-Wienner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数正相关;放牧处理下地上生物量与密度、物种丰富度正相关。放牧处理改变了荒漠草原植物群落组成、结构和功能,进而改变了群落结构和功能的重要关系。

关键词: 荒漠草原; 放牧强度; 群落结构; 物种多样性; 地上生物量; 内蒙古

草地作为世界分布最广的陆地生态系统之一,其面积占全球陆地总面积的 20%[1]。我国各种类型草地的总面积为 3.92×10^6 km^2,占国土面积的 41.7%[2],主要分布于北方地区,其中内蒙古草原面积占全国草原总面积的 19.3%[3]。在全球气候变化背景下,人类活动的剧烈影响使草地的退化十分严重,已成为干旱、半干旱地区最为突出的生态环境问题之一。这将极大地影响草地生态系统的生物多样性、生产力和稳定性,制约社会、经济和生态环境的可持续发展[4]。因而,研究草地生态系统的结构和功能对人类活动的响应及适应机制是维持草地生态系统服务功能及其可持续发展亟需解决的重大科学问题,对于指导和改善人类对草地的保护和利用具有极为重要的科学意义。

荒漠草原因其地理条件和物种组成及群落结构和功能上的独特性,故而在我国温带草原保护、利用和研究中占有重要的地位[5]。它属于草原向荒漠过渡的最干旱的草原生态系统类型[6],由于其植被稀疏,养分贫瘠的自然条件,以及气候变化和人类过度的利用,目前荒漠草原均出现不同程度的退化,且逐年加剧[7]。我国的荒漠草原总面积为 1.90×10^3 km^2,占全国草原总面积的 4.82%,并且大都分布于荒漠区以东,以狭带状呈东北 – 西南方向分布[8]。其中位于内蒙古西北部的乌拉特荒漠草原属于荒漠植物成分强烈侵入草原的植被类型,是草原与荒漠的过渡地带[9]。该区域的植被对气候变化的响应更为敏感,更容易受到气候变化和人类活动干扰的影响。

作为草地最主要的利用形式,放牧对生物多样性的维持和植物群落的构建具有重要影响[10]。大量关于放牧对草原群落多样性、稳定性及生产力影响的研究多有报道[11-13]。有研究发现,适当强度的放牧能使植物群落的资源丰富度和复杂程度增加,有利于草地植物群落稳定性的维持和群落生产力的

① **收稿日期:** 2019-04-28; **修订日期:** 2019-07-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(41622103,41571106);中国科学院青年创新促进会项目(1100000036)资助
作者简介: 赵生龙(1989-),男,汉族,博士研究生,主要从事荒漠草原生态学研究工作. E-mail:13619398146@163.com
通讯作者: 左小安. E-mail:zuoxa@lzb.ac.cn

提高[14-16];长期的过度放牧则会降低植被的盖度、物种多样性和生产力[17-18],也会导致半干旱草原的灌丛化[19],严重影响草地生态系统的结构和功能。研究表明,放牧通过采食、践踏和排泄物等方式来改变植被结构和土壤理化性质,增加生境异质性,进而影响整个草地生态系统过程[20-22]。目前,已有大量关于放牧强度影响植物群落特征的研究,主要表现在放牧强度对群落组成和群落生产力的影响[12,23-28];对物种多样性的影响[15,16,27];对物种多样性与生产力关系的影响[5,26,29-30]等方面,但这些研究主要集中在高寒草甸、高山草地和典型草原以及草甸草原,在荒漠草原区域的研究相对较少,尤其是在乌拉特荒漠草原区,其植被特征是如何响应不同放牧强度的相关研究鲜见报道。

因此,开展不同放牧强度对乌拉特荒漠草原植物群落结构和物种多样性影响的研究尤为必要。基于此,本研究选择乌拉特荒漠草原区具有代表性的2种植物作为研究对象,设置不同放牧强度的控制试验,通过对2种植物群落的种类组成、物种多样性以及地上生物量变化的研究,揭示荒漠草原群落结构和物种多样性在不同放牧强度下的变化规律,为保护荒漠草原生物多样性和构建科学的经营管理制度提供参考依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特后旗中国科学院乌拉特荒漠草原研究站,地理位置41°25′N,106°58′E,海拔1 650 m,占地面积约333.34 hm^2,属温带大陆性季风气候,冬季寒冷干旱,夏季干燥炎热,年均风速5 $m \cdot s^{-1}$,年内10 $m \cdot s^{-1}$以上风速日数达52 d;年平均气温5.3 ℃,最低气温 -34.4 ℃,最高气温37 ℃,≥10 ℃的年积温2 000 ~3 000 ℃;年平均降水量为180 mm,其中7—8月的降水量占全年降水量的70%,年蒸发量超过降水量的10倍[31]。土壤类型为棕钙土和灰棕漠土,植被以荒漠草原和荒漠灌丛为主[32],主要优势物种有沙生针茅(*Stipa glareosa*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、碱韭(*Allium polyrhizum*)等。试验场从2011年起开始围封,从南到北是以沙生针茅(*Stipa glareosa*)为主的草本植物群落和以红砂(*Reaumuria songarica*)为主的灌丛植物群落。围封的试验场能代表该区域的主要植被类型。

1.2 试验设计

根据试验区优势植物种群的分布,分别选择灌丛草地和草本草地2种植被作为放牧试验的背景。每种植被类型设计3个放牧处理梯度,每个处理5个重复,在2013年共建立30个放牧小区。不同放牧强度的3个处理为:对照(CK)、中度放牧(MG)、重度放牧(HG)。根据2种植被类型可食草的生物量,即草地的生产力,设置2种草地的放牧率。例如,灌丛草地的放牧率设定为:CK为0羊·hm^{-2},MG为0.5羊·hm^{-2}(小区内2只绵羊),HG为1羊·hm^{-2}(小区内4只绵羊);而针茅草地的放牧率设定为:CK为0羊·hm^{-2},MG为2羊·hm^{-2}(小区内2只绵羊),HG为4羊·hm^{-2}(小区内4只绵羊)。放牧集中在6—10月;放牧期间,每天从06:00—18:00,羊群夜间圈养在围栏内。放牧时选择质量相近,健康无病的2岁大的当地绵羊进行放牧试验,每3 a更换一次供试绵羊。

1.3 样地调查及采样

2017年8月中旬植物生长旺季,在研究区的每个试验样地内随机设置5个样方(草本区为1 m×1 m;灌丛区为2 m×2 m,测定完成后将数据换算成1 m^2)进行植物群落调查,调查指标包括物种组成、高度(用卷尺测量从植株底部到植物冠层的自然高度,每种植物测量3~5株)、盖度(针刺法,1 m×1 m样方框分割成面积相等的100个0.1 m×0.1 m的小格)、密度(对每个取样样方内的物种计数,作为每个物种的密度,株·m^{-2})。植被调查完后,对每个样方采用收割法,分物种获取每种植物的鲜重,同时收获地上的凋落物并装入信封,带回实验室,在65 ℃下烘干至恒重并测量其干重,得到地上生物量和凋落物量。

1.4 数据处理

物种多样性分别用物种丰富度、Simpson优势度、Shannon-Wienner多样性和Pielou均匀度指数进行表征,物种的重要值用物种的相对盖度、相对高度和相对密度计算。各个指标的计算公式如下:

$$重要值 = (C_R + H_R + D_R)/3$$

$$物种丰富度指数(SR):SR = \sum_{i=1}^{S} S_i$$

$$Simpson 优势度指数(D):D = \sum_{i=1}^{S} N_i^2$$

Shannon-Wienner 多样性指数(H):

$$H = -\sum_{i=1}^{S}(N_i \ln N_i)$$

Pielou 均匀度指数(J):$J = H/\ln S$

式中:C_R 相对盖度;H_R 是相对高度;D_R 是相对密度;N_i 代表种 i 的相对重要值;S 代表群落物种数。

文中数据处理采用 Excel 2010 软件完成,并使用 Sigmaplot 12.5 软件作图。所有数据采用 SPSS 19.0 统计软件进行处理与分析。不同放牧处理对植被特征的影响采用单因素方差分析法(ANOVA)进行差异性比较,差异性检验用最小显著性差异法(LSD),显著水平为 0.05。不同放牧处理对地上生物量和物种多样性关系的影响采用简单线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 放牧强度对灌丛和草本植物群落物种组成和重要值的影响

从表 1 可以得出,不同放牧强度下 2 种植物群落中主要优势物种的重要值发生了变化。在灌丛群落中,优势物种为红砂、沙生针茅和碱韭,且随放牧强度的增加,沙生针茅的重要值减小,红砂和碱韭的重要值增大;总的物种数先增大后减小。在草本群落中,优势物种为沙生针茅、碱韭、骆驼蓬和蒙古韭,重牧降低了沙生针茅的优势度,增加了碱韭的优势度;且随放牧强度的增加,总的物种数逐渐减小。从表 1 也可看出,对照与放牧处理下,2 种植物群落中优势物种的地位没有发生根本性变化。

2.2 放牧强度对植物群落结构特征的影响

不同放牧强度和植被类型对荒漠草原植物群落特征影响的方差分析如表 2 所示。从表 2 可以看出,高度、密度、地上生物量、Simpson 优势度指数、Shannon-Wienner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数在不同植被类型之间差异极显著($P < 0.01$);凋落物量和物种丰富度在不同植被类型之间差异较显著($P < 0.05$)。盖度、高度、地上生物量和凋落物量在不同放牧强度处理之间差异极显著($P < 0.01$);密度和物种丰富度在不同放牧强度处理之间差异较显

表 1 不同放牧强度下 2 种植物群落优势物种的种类组成及重要值(平均值 ± 标准差)

Tab. 1 Composition and important values of the dominant species in two plant communities under different grazing intensities (Mean ± SE)

植物名称	生活型	重要值/%					
		灌丛植被			草本植被		
		对照	中牧	重牧	对照	中牧	重牧
红砂 *Reaumuria songarica*	S	15.44 ± 1.33	18.77 ± 1.23	25.25 ± 1.51	–	–	–
珍珠猪毛菜 *pearl russianthistle*	S	7.27 ± 1.02	1.86 ± 1.30	1.75 ± 1.15	–	–	–
沙生针茅 *Stipa glareosa*	PG	33.22 ± 3.07	33.12 ± 4.99	26.77 ± 1.24	63.12 ± 4.26	63.81 ± 2.38	60.32 ± 8.21
碱韭 *Allium polyrhizum*	PG	17.89 ± 1.14	18.33 ± 2.23	24.10 ± 2.70	5.36 ± 1.41	2.53 ± 1.34	7.68 ± 6.29
无芒隐子草 *Cleistogenes songorica*	PG	5.54 ± 0.74	4.13 ± 0.82	4.47 ± 1.13	1.16 ± 0.44	–	–
冷蒿 *Artemisia frigida*	PG	3.93 ± 1.20	9.78 ± 4.30	2.68 ± 0.66	0.61 ± 0.61	–	0.63 ± 0.47
戈壁天门冬 *Asparagus gobicus*	S	4.76 ± 0.89	2.25 ± 0.57	2.12 ± 0.42	4.71 ± 1.37	2.45 ± 0.25	2.66 ± 0.63
苔草 *Carexgiraldiana*	PG	2.42 ± 0.45	2.98 ± 0.68	5.87 ± 1.30	–	–	–
骆驼蓬 *Peganum harmala*	PG	0.86 ± 0.86	0.44 ± 0.27	0.42 ± 0.28	6.05 ± 2.51	5.13 ± 1.79	6.44 ± 5.49
蒙古韭 *Allium mongolicum*	PG	–	0.48 ± 0.29	0.26 ± 0.26	11.59 ± 1.20	10.54 ± 2.83	12.09 ± 2.92
猫头刺 *Oxytropis aciphylla*	S	1.57 ± 0.46	1.60 ± 0.29	2.01 ± 0.50	0.63 ± 0.30	1.81 ± 0.61	1.30 ± 0.63
物种总数		18	22	18	20	18	16

注:S 表示灌木;PG 表示多年生草本。

表 2 放牧强度与植被类型及其交互作用对植物群落结构特征的影响

Tab. 2 Effects of grazing intensities, vegetation types and their interaction on the structure of plant communities

	植被盖度	植被高度	植被密度	地上生物量	凋落物量	物种丰富度	Simpson 优势度指数	Shannon-Wienner 多样性指数	Pielou 均匀度指数
	F	F	F	F	F	F	F	F	F
植被类型	0.03	58.90 **	105.65 **	36.69 **	4.62 *	7.65 *	60.97 **	57.57 **	70.71 **
放牧强度	51.54 **	28.83 **	5.22 *	37.55 **	28.84 **	3.41 *	0.14	1.09	0.64
植被类型与放牧强度交互作用	2.79	0.16	4.43 *	0.27	1.80	0.07	0.05	0.19	0.50

注：* 表示显著水平 $P<0.05$，* * 表示显著水平 $P<0.01$。

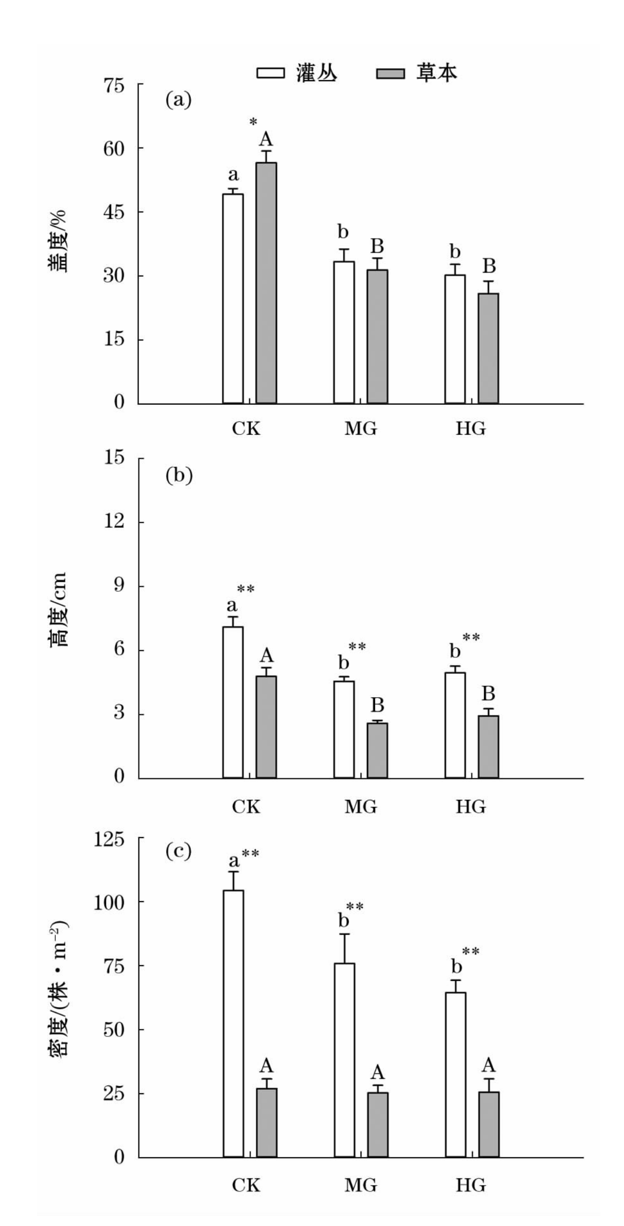
著（$P<0.05$）。此外，植被类型和放牧强度的交互作用与植物群落密度关系密切（$P<0.05$）。

2.3 放牧强度对灌丛和草本植物群落物种多样性和地上生物量的影响

图 1 所示，不同放牧强度下，2 种植物群落的盖度和高度差异显著（$P<0.05$），密度在灌丛群落中差异显著（$P<0.05$），在草本群落中差异不显著（$P>0.05$）；盖度和高度在 2 种植物群落中及密度在灌丛群落中均是对照高于中牧和重牧处理，但在中牧和重牧处理之间差异不显著（$P>0.05$）。对照和不同放牧处理下，高度和密度在 2 种植物群落之间差异显著（$P<0.01$）；对照处理下，盖度在 2 种植物群落之间差异显著（$P<0.05$），但在中牧和重牧处理之间无显著差异（$P>0.05$）。

从图 2 可以看出，灌丛群落的物种丰富度和 Pielou 均匀度指数在对照和不同放牧处理之间差异显著（$P<0.05$），灌丛群落的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wienner 多样性指数以及草本群落的物种丰富度、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wienner 多样性指数在对照和不同放牧处理之间差异不显著（$P>0.05$）。在对照和不同放牧处理下，Simpson 优势度指数、Shannon-Wienner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数在 2 种植物群落之间差异显著（$P<0.01$），物种丰富度在 2 种植物群落之间无显著差异（$P>0.05$）。上述结果表明，灌丛群落物种丰富度和 Pielou 均匀度指数均受到放牧的显著影响，中牧降低了灌丛群落的 Pielou 均匀度指数，重牧降低了灌丛群落的物种丰富度；草本群落的多样性则未受到不同放牧处理的显著影响。

不同放牧强度对 2 种植物群落地上生物量和凋落物量的影响如图 3 所示。2 种植物群落的地上生物量和凋落物量在对照和不同放牧处理之间差异显著（$P<0.05$），均表现为对照处理高于中牧和重牧处理，但在中牧和重牧处理之间无显著差异（$P>$



注：CK 为对照处理，MG 为中度放牧处理，HG 为重度放牧处理。不同大写字母代表草本群落不同放牧处理之间差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母代表灌丛群落不同放牧处理之间差异显著（$P<0.05$）；* 表示同一放牧处理下不同植物群落之间差异显著，显著水平 $P<0.05$，* * 表示显著水平 $P<0.01$。下同。

图 1 放牧强度对植物群落盖度、高度和密度的影响

Fig. 1 Effects of grazing intensity on the coverage, height and density of plant communities

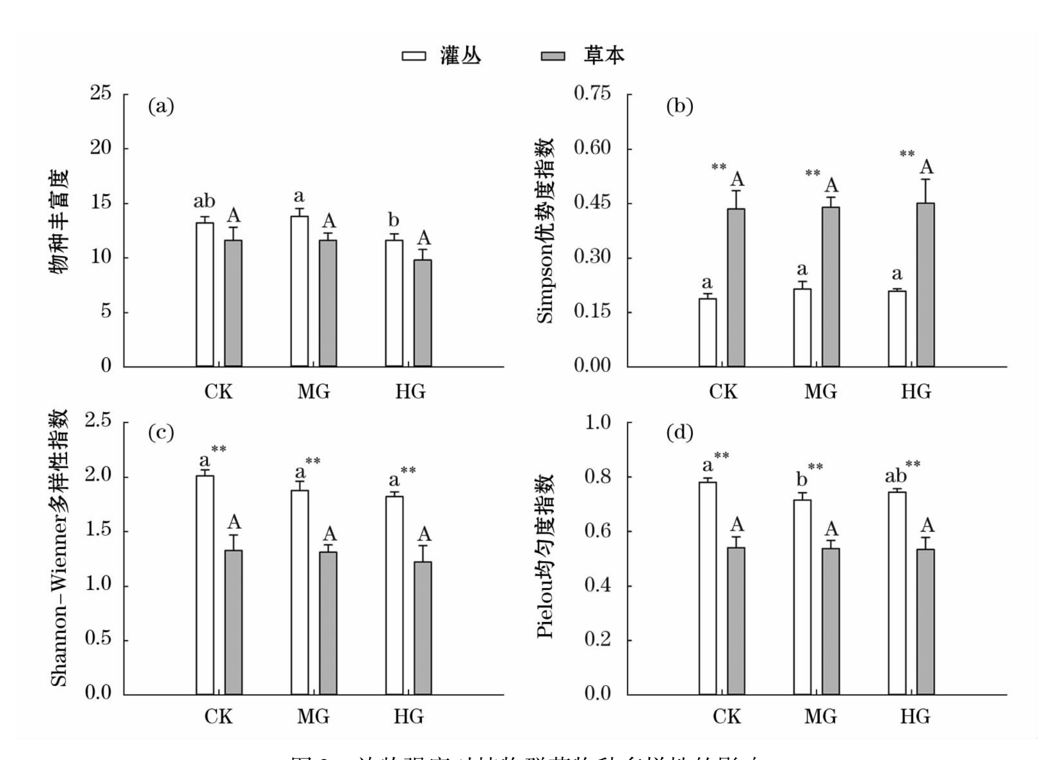


图 2　放牧强度对植物群落物种多样性的影响

Fig. 2　Effect of grazing intensity on the species diversity of plant communities

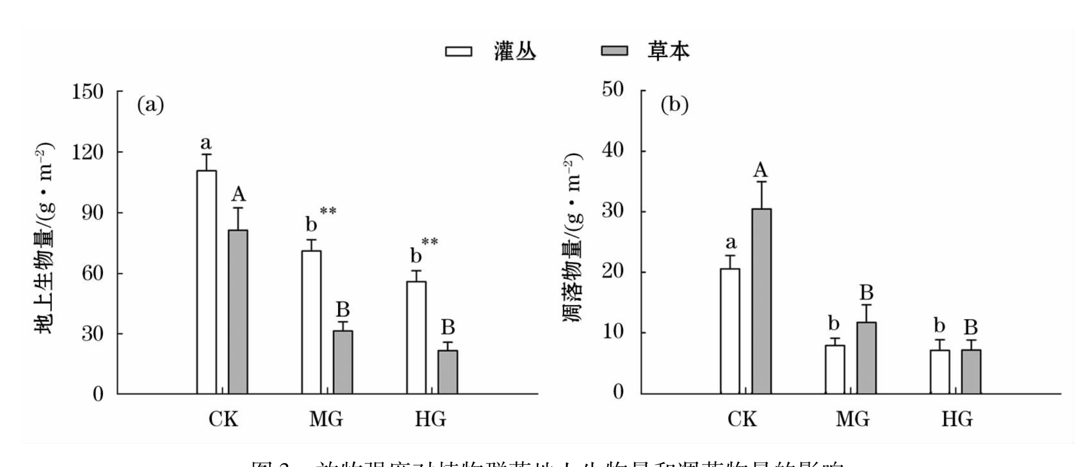


图 3　放牧强度对植物群落地上生物量和凋落物量的影响

Fig. 3　Effect of grazing intensity on the aboveground biomass and litter biomass of plant communities

0.05)。对照处理下,地上生物量在 2 种植物群落之间无显著差异($P>0.05$);中牧和重牧处理下,地上生物量在 2 种植物群落之间差异显著($P<0.01$)。对照和不同放牧处理下,凋落物量在 2 种植物群落之间无显著差异($P>0.05$)

2.4　放牧强度对地上生物量与植物群落高度、密度和多样性关系的影响

不同放牧强度对地上生物量与植物群落结构、多样性关系的影响如图 4 所示。在对照和不同放牧处理下,地上生物量与高度呈显著的正线性关系($P<0.05$)。在对照处理下,地上生物量与密度、物种丰富度的关系不显著($P>0.05$);在中牧和重牧处理下,地上生物量与密度、物种丰富度均呈显著的正线性关系($P<0.05$),说明放牧处理影响了地上生物量与密度和物种丰富度的关系。在对照、中牧和重牧处理下,地上生物量与 Simpson 优势度指数呈显著的负线性关系($P<0.05$);地上生物量与 Shannon-Wienner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数呈显著的正线性关系($P<0.05$)。

3　讨 论

本研究得出,在灌丛群落中,优势物种为红砂、

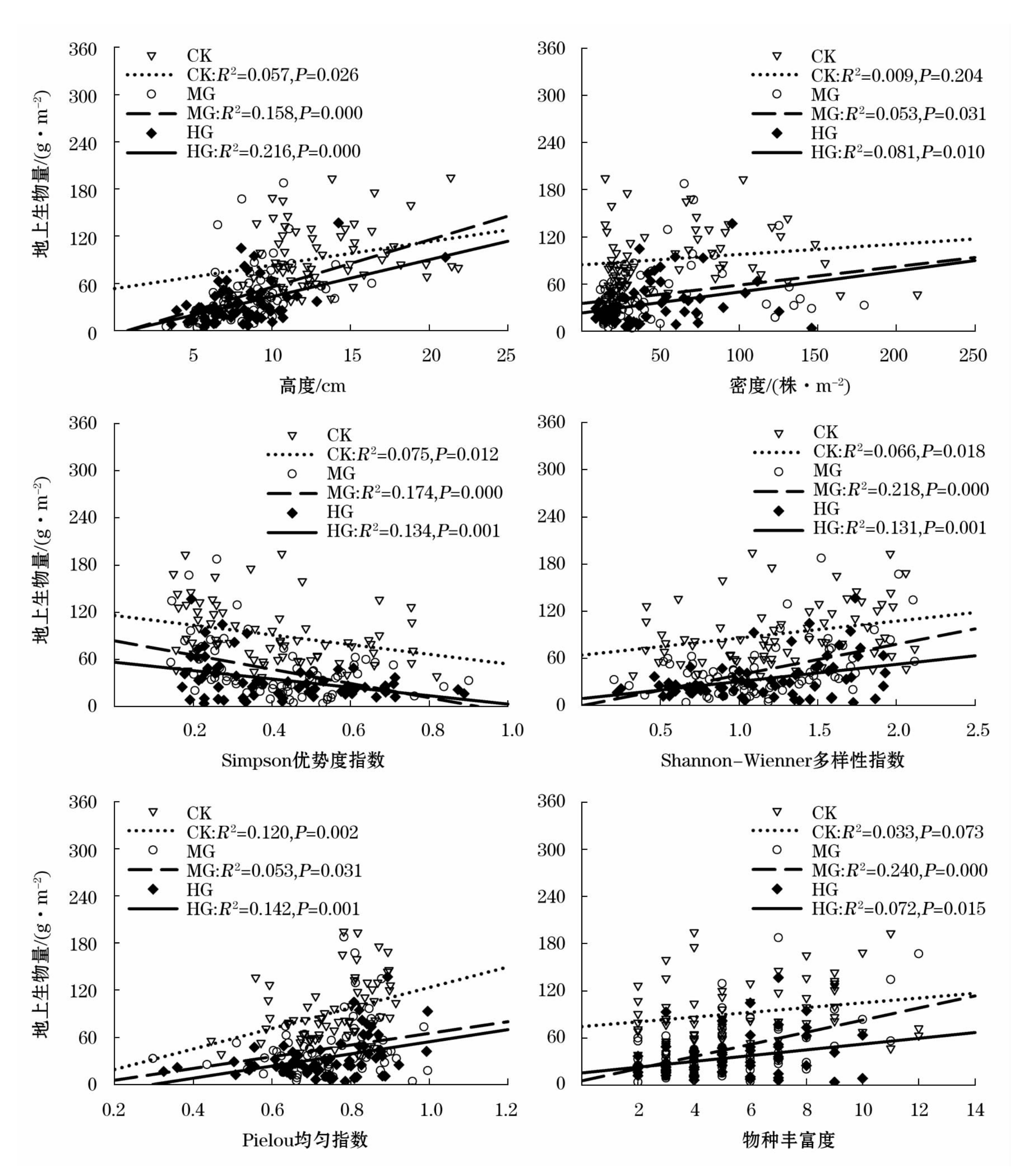


图 4　放牧强度对地上生物量与物种多样性关系的影响

Fig. 4　Effect of grazing intensity on the relationship between aboveground biomass and species diversity

沙生针茅和碱韭，且随放牧强度的增大，沙生针茅的重要值减小，红砂和碱韭的重要值增大。在草本群落中，优势物种为沙生针茅、碱韭、骆驼蓬和蒙古韭。其中红砂、沙生针茅、碱韭和蒙古韭均稳定出现于不同放牧强度下的 2 种草地中，且在 3 个放牧强度下都有重要地位，说明在荒漠草原群落中，优势物种多年生草本植物沙生针茅和小灌木红砂具有较强的适应能力，可以在这 2 种植被中保持强的竞争力[33]。

植物的生长主要受到当地的气候条件、土壤性质和地形等环境因素的影响，但对同一区域而言，这些因素基本相同，因而影响群落特征的主要因素是放牧强度的大小。本研究结果显示，与对照相比，中度和重度放牧强度下 2 种植物群落的盖度、高度以及灌丛植物群落的密度降低，这与前人研究的结果相一致[34]，但在中度和重度放牧强度之间差异不显著（$P>0.05$），可能与其放牧时间较短或设置的放牧压力梯度较小有关，原因有待于进一步研究。作为反映草原生态系统和放牧系统稳定性的一个重要指标，放牧条件下地上生物量的大小可判断草原的载畜能力和生产潜力等[26]。研究表明，群落组分在

放牧胁迫条件下有直接的损失,进而能影响群落的生产力[35]。本研究结果显示,随放牧强度的增加,虽然灌丛和草本植物群落的地上生物量在中度和重度放牧强度之间差异不显著($P>0.05$),但整体呈现出降低的变化趋势。这是因为随放牧强度的增加,家畜更加频繁的采食,降低了植物的生物量,其物质能量的积累受到影响,进而影响植物的繁殖和生长发育,造成草地生产力的降低。这与前人的研究结果相一致[26,35-36]。由此可见,放牧对植物群落的影响主要表现在降低了其盖度、高度、生产力和减少凋落物量。

草地群落物种多样性对维持草地生态系统结构、功能的稳定及可持续发展有重大作用[37]。放牧干扰不但能影响群落物种多样性,而且其影响的程度因放牧强度的大小而有所不同[38];适度的放牧干扰可以增加植物群落物种多样性,而过度的放牧干扰则会降低其物种多样性[39]。本研究结果显示,尽管灌丛群落的物种丰富度在对照和中牧处理下差异不显著($P>0.05$),但随放牧强度的增加,整体呈现出先增大后减小的趋势,与前人的研究结果基本吻合[40]。这是因为适度的放牧干扰抑制了优势物种的竞争能力,使一些非优势物种和家畜不喜采食的杂类草数量增加,从而增加了群落结构的复杂性,使群落物种的多样性有一定程度的增加[41]。这在一定程度上支持了"中度干扰假说"。该假说认为,适度的干扰会抑制原有优势种的生长竞争,为竞争力差的物种提供了机会,使其能在适度干扰下更好生存,致使此环境下植物群落保持了较高的多样性[14]。本研究还发现,重牧降低了灌丛群落的物种丰富度,这可能是因为在重度放牧下,家畜的过度采食导致向土壤中输入的有机质减少,土壤养分消耗过度,植物的竞争能力受到影响[38],导致植物群落物种多样性降低。Pielou 均匀度指数反映了植物种类组成的协调性和利用空间资源的合理分配性。本研究结果显示,均匀度指数在对照区最大,不同放牧处理下有所降低,这与董全民等[38]的研究结果不一致。这是因为形成植物群落结构特征和植物群落物种多样性分布格局差异的主要原因是不同的环境资源和环境异质性[42]。此外,通过对不同放牧强度下草本群落多样性的分析表明,物种多样性和均匀度在不同放牧强度之间差异不显著($P>0.05$),可能是这些指数对该试验放牧强度响应较不敏感,也可能是因为草本群落中的物种对一定强度的放牧有较强的适应能力。

研究草地生产力和群落物种多样性的关系,对于正确理解草地生态系统结构和功能具有重要的意义[43]。有研究表明,物种多样性和生产力的关系由于能量、资源和环境条件存在较大的时间和空间异质性而表现为多种形式[44],如线性正相关、线性负相关、U 形、单峰形和不相关等[45-49]。本研究结果表明,在对照和不同放牧强度下,地上生物量与 Shannon-Wienner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均呈显著正线性关系($P<0.05$);在不同放牧强度下,地上生物量与物种丰富度呈显著正线性关系($P<0.05$),这与前人的研究结果基本一致[47,50]。主要是由于同一植物群落中物种间存在着生态位差异,有较多物种数的植物群落所占据的"功能空间"范围就更广,因而物种多样性较大的生态系统可以更有效地利用各种资源,从而获得更高的生产力[51]。本研究结果中群落物种多样性和生物量没有显示出单峰形式的关系,可能原因是这 3 种放牧强度下植物群落所构成的环境范围还没有达到单峰形式的下降部分,也可能是因为该模式就是乌拉特荒漠草原在不同放牧强度下群落物种多样性与地上生物量关系的基本描述。有关不同放牧强度下物种多样性和地上生物量的相互关系及其影响机制还有待于深入研究。

4 结 论

(1) 在本研究的对照和不同放牧处理下,荒漠草原灌丛植物群落中优势物种为红砂、沙生针茅和碱韭,草本植物群落中优势物种为沙生针茅、碱韭和蒙古韭,放牧处理并没有改变其优势种。

(2) 不同放牧处理降低了灌丛和草本植物群落的盖度、高度、地上生物量和凋落物量;中牧降低了灌丛植物群落的 Pielou 均匀度指数,重牧降低了灌丛植物群落的物种丰富度;草本植物群落的物种多样性对不同放牧处理有一定的抵抗力。

(3) 在对照和放牧处理下,地上生物量与多样性指数和均匀度指数表现出线性增加的关系。荒漠草原物种多样性与生产力的关系比较密切,放牧处理使得地上生物量与物种丰富度呈线性增加的关系。

参考文献(References):

[1] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland

perspective〔J〕. Global Change Biology, 1998, 4(2): 229－233.

〔2〕 方精云,杨元合,马文红,等. 中国草地生态系统碳库及其变化〔J〕. 中国科学:生命科学,2010,40(7):566－576.〔Fang Jingyun, Yang Yuanhe, Ma Wenhong, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands〔J〕. Scientia Sinica Vitae,2010,40(7):566－576.〕

〔3〕 宋丽弘,唐孝辉. 内蒙古草原碳汇经济发展的基础与路径〔J〕. 中国草地学报,2012,34(2):1－7.〔Song Lihong, Tang Xiaohui. The foundation and path of development of grassland carbon sink economy in Inner Mongolia〔J〕. Chinese Journal of Grassland, 2012,34(2):1－7.〕

〔4〕 Petchey O L, Casey T, Jiang L, et al. Species richness, environmental fluctuations, and temporal change in total community biomass〔J〕. Oikos,2002,99(2):231－240.

〔5〕 韩国栋,焦树英,毕力格图,等. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响〔J〕. 生态学报,2005,27(1): 182－188.〔Han Guodong, Jiao Shuying, Biligetu, et al. Effects of plant species diversity and productivity under different stocking rates in the *Stipa breviflora* Griseb. desert steppe〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2005,27(1):182－188.〕

〔6〕 中国科学院蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被〔M〕. 北京:科学出版社,1985:405－408.〔Ningxia Comprehensive Investigation Team of Inner Mongolia, Chinese Academy of Sciences. Vegetation in Inner Mongolia〔M〕. Beijing: Science Press,1985:405－408.〕

〔7〕 武海霞,王则宇,尹强,等. 我国北方荒漠草原退化研究进展〔J〕. 内蒙古林业科技,2017,43(2):58－62.〔Wu Haixia, Wang Zeyu, Yin Qiang, et al. Research progress on degradation of desert steppe in Northern China〔J〕. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology,2017,43(2):58－62.〕

〔8〕 曲浩,赵学勇,王少昆,等. 乌拉特荒漠草原不同植被群落对土壤碳、氮的影响〔J〕. 草业科学,2014,31(3):355－360.〔Qu Hao, Zhao Xueyong, Wang Shaokun, et al. Effect of different vegetation communities on soil carbon and nitrogen contents in Urat desert steppe〔J〕. Pratacultural Science,2014,31(3):355－360.〕

〔9〕 张蕊,赵学勇,左小安,等. 荒漠草原沙生针茅(*Stipa glareosa*)群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应〔J〕. 中国沙漠,2019,39(2):1－8.〔Zhang Rui, Zhao Xueyong, Zuo Xiao'an, et al. Responses of the *Stipa glareosa* community species diversity and above-ground biomass to precipitation in the desert-steppe region in Northern China〔J〕. Journal of Desert Research,2019,39(2):1－8.〕

〔10〕 Sasaki T, Okayasu T, Shirato Y, et al. Can edaphic factors demonstrate landscape-scale differences in vegetation responses to grazing?〔J〕. Plant Ecology,2008,194(1):51－66.

〔11〕 刘秀梅,李小锋. 围栏封育对新疆山地退化草原植物群落特征的影响〔J〕. 干旱区研究,2017,34(5):1 077－1 082.〔Liu Xiumei, Li Xiaofeng. Effects of enclosure on plant community characters of degenerated steppe in Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research, 2017,34(5):1 077－1 082.〕

〔12〕 Gao Y Z, Giese M, Lin S, et al. Belowground net primary productivity and biomass allocation of a grassland in Inner Mongolia is affected by grazing intensity〔J〕. Plant and Soil,2008,307(1－2): 41－50.

〔13〕 Dong Q M, Zhao X Q, Wu G L, et al. Response of soil properties to yak grazing intensity in a Kobresia parva-meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China〔J〕. Journal of Soil Science & Plant Nutrition,2012,12(3):535－546.

〔14〕 Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs〔J〕. Science,1978,199(4 335):1 302－1 310.

〔15〕 Baker J P. Nature management by grazing and cutting Ceobotany〔J〕. Kluwer Academic Publisher,1989,5:11－17.

〔16〕 李永宏. 放牧影响下羊草草原和短花针茅草原植物多样性的变化〔J〕. 植物学报,1993,35(11):877－884.〔Li Yonghong. Grazing dynamics of the species diversity in *Aueurolepidium chinese* steppe and *Stipa grandis* steppe〔J〕. Acta Botanica Sinica,1993, 35(11):877－884.〕

〔17〕 王德利,祝廷成. 不同种群密度关态下羊草地上部生态场、生态势、场梯度及其季节性变化规律研究〔J〕. 生态学报,1996, 16(2):121－127.〔Wang Deli, Zhu Tingcheng. Regularity of the ecological potential and gradient of aboveground ecological field of *Aneurolepidium chinese* and their seasonal changes under different population densities〔J〕. Acta Ecologica Sinica,1996,16(2):121－127.〕

〔18〕 Xu M Y, Xie F, Wang K, et al. Response of vegetation and soil carbon and nitrogen storage to grazing intensity in semi-arid grasslands in the agro-pastoral zone of Northern China〔J〕. PLoS ONE,2014, 9(5):e96604.

〔19〕 熊小刚,韩兴国,白永飞,等. 锡林河流域草原小叶锦鸡儿分布增加的趋势、原因和结局〔J〕. 草业学报,2003,12(3):57－62.〔Xiong Xiaogang, Han Xinguo, Bai Yongfei, et al. Increased distribution of *Caragana microphylla* in rangelands and its causes and consequences in Xilin River Basin〔J〕. Acta Prataculturae Sinica, 2003,12(3):57－62.〕

〔20〕 刘楠,张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响〔J〕. 草业科学,2010,27(4):11－14.〔Liu Nan, Zhang Yingjun. Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe〔J〕. Pratacultural Science,2010,27(4):11－14.〕

〔21〕 王向涛,张世虎,陈懂懂,等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究〔J〕. 草地学报,2010,18(4):510－516.〔Wang Xiangtao, Zhang Shihu, Chen Dongdong, et al. The effects of natural grazing intensity on plant community and soil nutrients in alpine meadow〔J〕. Acta Agrestia Sinica,2010,18(4): 510－516.〕

〔22〕 王明君,赵萌莉,崔国文,等. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响〔J〕. 草地学报,2010,18(6):758－762.〔Wang Mingjun, Zhao Mengli, Cui Guowen, et al. Effect of grazing intensities on vegetation and soil in meadow steppe〔J〕. Acta Agrestia Sinica, 2010,18(6):758－762.〕

〔23〕 白哈斯. 不同放牧率对羊草＋苔草低地草甸草地再生和净初级生产力的影响〔J〕. 干旱区研究,2007,24(6):826－829.〔Bai Hasi. Influence of different stocking rates on herbage regeneration and net primary productivity in low land meadow〔J〕. Arid Zone Research,2007,24(6):826－829.〕

〔24〕 董全民,马玉寿,李青云,等. 牦牛放牧率对小嵩草高寒草甸暖季草场植物群落组成和植物多样性的影响〔J〕. 西北植物学报,2005,25(1):94－102.〔Dong Quanmin, Ma Yushou, Li Qingyun, et al. Effects of stocking rates for yak on community composition and plant diversity in *Kobresia parva* alpine meadow warm-season pasture〔J〕. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005,25(1):94－102.〕

〔25〕 Manier D J, Hobbs N T. Large herbivores in sagebrush steppe ecosystems: Livestock and wild ungulates influence structure and function〔J〕. Oecologia, 2007, 152(4): 739 – 750.

〔26〕 段敏杰,高清竹,万运帆,等. 放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响〔J〕. 生态学报, 2010, 30(14): 3 892 – 3 900.〔Duan Minjie, Gao Qingzhu, Wan Yunfan, et al. Effect of grazing on community characteristics and species diversity of *Stipa purpurea* alpine grassland in Northern Tibet〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3 892 – 3 900.〕

〔27〕 王明君,韩国栋,崔国文,等. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响〔J〕. 生态学杂志, 2010, 29(5): 862 – 868.〔Wang Mingjun, Han Guodong, Cui Guowen, et al. Effects of grazing intensity on the biodiversity and productivity of meadow steppe〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(5): 862 – 868.〕

〔28〕 安慧,李国旗. 放牧对荒漠草原植物生物量及土壤养分的影响〔J〕. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 705 – 712.〔An Hui, Li Guoqi. Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe〔J〕. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 705 – 712.〕

〔29〕 Mwendera E J, Saleem M A M, Woldu Z. Vegetation response to cattle grazing in the Ethiopian highlands〔J〕. Agriculture Ecosystems and Environment, 1997, 64(1): 43 – 51.

〔30〕 徐广平,张德罡,徐长林,等. 放牧干扰对东祁连山高寒草地植物群落物种多样性的影响〔J〕. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(6): 789 – 796.〔Xu Guangping, Zhang Degang, Xu Changlin, et al. Effect of grazing disturbance on species diversity of alpine grassland plant community in Eastern Qilian Mountains〔J〕. Journal of Gansu Agricultural University, 2005, 40(6): 789 – 796.〕

〔31〕 王少昆,赵学勇,贾昆峰,等. 乌拉特荒漠草原小针茅(*Stipa klemenzii*)群落土壤细菌多样性及垂直分布特征〔J〕. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1 564 – 1 570.〔Wang Shaokun, Zhao Xueyong, Jia Kunfeng, et al. Soil bacterial diversity and its vertical distribution in *Stipa klemenzii* community of Urat Desert Steppe〔J〕. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1 564 – 1 570.〕

〔32〕 赵学勇,刘良旭,王玮,等. 降水波动对荒漠草原生产力的影响〔J〕. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1 486 – 1 495.〔Zhao Xueyong, Liu Liangxu, Wang Wei, et al. Impacts of precipitation change on desert-grassland vegetation productivity〔J〕. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1 486 – 1 495.〕

〔33〕 卫智军,韩国栋,赵钢,等. 中国荒漠草原生态系统研究〔M〕. 北京:科学出版社, 2013.〔Wei Zhijun, Han Guodong, Zhao Gang, et al. Study on Desert Grassland Ecosystem in China〔M〕. Beijing: Science Press, 2013.〕

〔34〕 罗亚勇,赵学勇,左小安,等. 放牧与封育对沙质草地植被特征及其空间变异性的影响〔J〕. 干旱区研究, 2008, 25(1): 118 – 124.〔Luo Yayong, Zhao Xueyong, Zuo Xiao'an, et al. Effects of livestock grazing and enclosure on vegetation and its spatial variability in Horqin Sandy Steppe, Inner Mongolia, China〔J〕. Arid Zone Research, 2008, 25(1): 118 – 124.〕

〔35〕 仁青吉,崔现亮,赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响〔J〕. 草业学报, 2008, 17(6): 134 – 140.〔Ren Qingji, Cui Xianliang, Zhao Binbin. Effects of grazing impact on community structure and productivity in an alpine meadow〔J〕. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(6): 134 – 140.〕

〔36〕 郑伟,董全民,李世雄,等. 放牧强度对环青海湖高寒草原群落物种多样性和生产力的影响〔J〕. 草地学报, 2012, 20(6): 1 033 – 1 038.〔Zheng Wei, Dong Quanmin, Li Shixiong, et al. Impacts of grazing intensities on community biodiversity and productivity of alpine grassland in Qinghai Lake region〔J〕. Acta agrestia sinica, 2012, 20(6): 1 033 – 1 038.〕

〔37〕 Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems〔J〕. Nature (London), 1996, 379(6 567): 718 – 720.

〔38〕 董全民,赵新全,马玉寿,等. 放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响〔J〕. 草地学报, 2012, 20(1): 10 – 16.〔Dong Quanmin, Zhao Xinquan, Ma Yushou, et al. Effect of grazing intensity on community character and aboveground present biomass of alpine mixed-sown pasture〔J〕. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(1): 10 – 16.〕

〔39〕 袁建立,江小蕾,黄文冰,等. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响〔J〕. 草业学报, 2004, 13(3): 16 – 21.〔Yuan Jianli, Jiang Xiaolei, Huang Wenbing, et al. Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow〔J〕. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(3): 16 – 21.〕

〔40〕 蒙旭辉,李向林,辛晓平,等. 不同放牧强度下羊草草甸草原群落特征及多样性分析〔J〕. 草地学报, 2009, 17(2): 239 – 244.〔Meng Xuhui, Li Xianglin, Xin Xiaoping, et al. Study on community characteristics and α diversity under different grazing intensity on *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. meadow steppe of Hulunbeier〔J〕. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(2): 239 – 244.〕

〔41〕 江小蕾,张卫国,杨振宇,等. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响〔J〕. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1 479 – 1 485.〔Jiang Xiaolei, Zhang Weiguo, Yang Zhenyu, et al. The influence of disturbance on community structure and plant diversity of alpine meadow〔J〕. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(9): 1 479 – 1 485.〕

〔42〕 王长庭,龙瑞军,王启基,等. 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究〔J〕. 生态学杂志, 2005, 24(5): 483 – 487.〔Wang Changting, Long Ruijun, Wang Qiji, et al. Relationship between species diversity and productivity in four types of alpine meadow plant communities〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 483 – 487.〕

〔43〕 杨利民,韩梅,周广胜,等. 草地群落物种多样性维持机制的研究 Ⅲ. 物种分布格局〔J〕. 吉林农业大学学报, 2002, 24(1): 58 – 61.〔Yang Limin, Han Mei, Zhou Guangsheng, et al. Studies on the maintaining mechanism of species diversity of grassland community Ⅲ. species distribution pattern〔J〕. Journal of Jilin Agricultural University, 2002, 24(1): 58 – 61.〕

〔44〕 马文红,方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系〔J〕. 生物多样性, 2006, 14(1): 21 – 28.〔Ma Wenhong, Fang Jingyun. The relationship between species richness and productivity in four typical grasslands of northern China〔J〕. Biodiversity Science, 2006, 14(1): 21 – 28.〕

〔45〕 Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, et al. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands〔J〕. Science, 1999, 286(5 442): 1 123 – 1 127.

〔46〕 Mittelbach G G, Steiner C F, Scheiner S M, et al. What is the observed relationship between species richness and productivity?〔J〕. Ecology, 2001, 82(9): 2 381 – 2 396.

〔47〕 Tilman D, Reich P B, Knops J, et al. Diversity and productivity in a

long-term grassland experiment[J]. Science, 2001, 294: 843 – 845.

[48] 郭轶瑞,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙质草地物种多样性与生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 198 – 203. [Guo Yirui, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Study on the relationship between species diversity and productivity of sandy grassland communities in Horqin Sandland[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 198 – 203.]

[49] 马文静,张庆,牛建明,等. 物种多样性和功能群多样性与生态系统生产力的关系——以内蒙古短花针茅草原为例[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 620 – 630. [Ma Wenjing, Zhang Qing, Niu Jianming, et al. Relationship of ecosystem primary productivity to species diversity and functional group diversity: Evidence from *Stipa breviflora* grassland in Nei Mongol[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7): 620 – 630.]

[50] Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1 023 – 1 034.

[51] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: Theoretical considerations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(5): 1 857 – 1 861.

Response of relationship between community species diversity and aboveground biomass to grazing intensity in the Urat desert steppe in north China

ZHAO Sheng-long[1,2], ZUO Xiao-an[1], ZHANG Tong-hui[1], LYU Peng[1,2], YUE Ping[1], ZHANG Jing[1,2]

(1. *Urat Station for Desert Steppe Research/Naiman Station for Desertification Research, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, the shrub and herb plant communities in the Urat desert steppe in Inner Mongolia were researched. The responses of different grazing treatments (control, moderate grazing and heavy grazing) to the composition of community species, species diversity and relationship between species diversity and aboveground biomass of two plant communities in the desert steppe were studied. The results were as follows: ① With the increase of grazing intensity, the dominant degree of *Reaumuria songarica and Allium polyrhizum* in shrub grassland community was increased, but that of *Stipa glareosa* was decreased. Moreover, heavy grazing reduced the dominant degree of *S. glareosa* and increased that of *A. mongolicum* and *A. polyrhizum* in the herb grassland community; ② Different grazing treatments reduced significantly the coverage and height of both two grassland communities and the density of shrub grassland community ($P < 0.05$), and removed the difference of coverage between the shrubs and herbs in the grassland community ($P > 0.05$). Moderate grazing reduced the Pielou evenness index in shrub grassland community, and heavy grazing reduced the species richness in shrub grassland community. There were no significant differences in other diversity indices in both shrub and herb grassland communities under the grazing treatments ($P > 0.05$). Except for species richness, the difference of other diversity indices between shrub and herb grassland communities were significant ($P < 0.05$); ③ Different grazing treatments reduced significantly the aboveground biomass and litter biomass in shrub and herb grassland communities, and resulted in the significant difference of aboveground biomass between shrub and herb grassland communities ($P < 0.05$); ④ There was a negative correlation between aboveground biomass and Simpson dominance index, and also a positive correlation between aboveground biomass and Shannon-Wienner diversity index and also between aboveground biomass and Pielou evenness index. Furthermore, aboveground biomass was positively correlated with density and species richness under grazing treatments. Additionally, grazing treatments changed the composition, structure and function of plant community in desert steppe, and then changed the important relationship between community structure and function.

Key words: desert steppe; grazing intensity; community structure; species diversity; aboveground biomass; Inner Mongolia